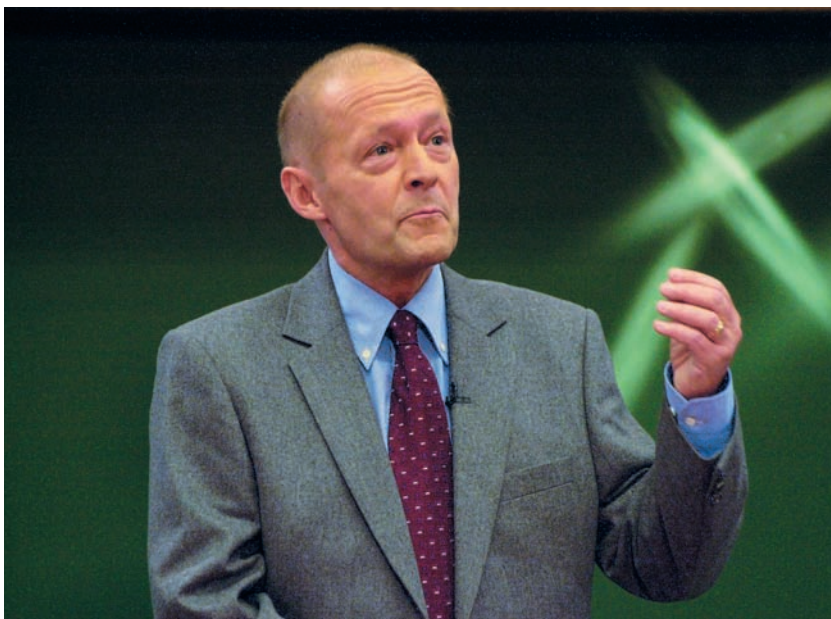


# SOMLYÓDY LÁSZLÓ

## Az értől az óceánig – a víz: a jövő kihívása



*Somlyódy László  
mérnök, egyetemi tanár  
az MTA rendes tagja*

1943-ban született. 1967-ben mérnökként diplomázott a Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Karán. 1978-ban a műszaki tudományok kandidátusa, 1985-ben akadémiai doktora, 1990-ben az MTA levelező, majd 1998-ban rendes tagja lett. Az MTA Műszaki tudományok Osztályának elnöke.

Pályáját a Szellőzőművek fejlesztőmérnökként kezdte, majd a Vítuki tudományos tanácsadója, később főigazgatója volt. Az MTA Vízgazdálkodási Kutató Csoportjának megalapítója és vezetője, a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék vezetője. Számos rangos nemzetközi szakfolyóirat szerkesztőbizottságának tagja.

Főbb kutatási területei: az áramlástan, a folyók és a tavak vízminőségének szabályozása, összetett környezeti problémák elemzésének módszerei. Vízművelési döntési modelleket és költségvetési stratégiákat dolgozott ki vízgyűjtők szennyezettségének szabályozására.

Sokan úgy vélik, elegendő mennyiségű egészséges vízzel rendelkezünk, és aggodalomra nincsen okunk. Mások vészharangot kongatnak: a víz a 21. század olajválságát hozhatja létre.

A víz megítélése roppant változatos. A városi emberek számára a víz csodája jelentős részben elveszett. Többségük úgy véli, bőségesen rendelkezésre álló közegről van szó, amelyet jól ismer és ért. Hozzászólt ahhoz, hogy gombnyomásra jut tiszta vízhez, az elhasznált, piszkos vizet pedig észrevétlenül nyeli el a csatorna. Izgalmat legfeljebb váratlan események okoznak: csőtörés, halpusztulás a Balatonon, cianid-szennyezés a Tiszán vagy hasonló. Mások, a száraz területeken élők igazi csodaként vágynak a víz után, és kincsként gazdálkodnak minden cseppjével: életük múlik ezen. Ismét mások a vizet az árvizekkel azonosítják. Elsősorban fenyegetettséget és tehetetlenséget éreznek: szeretnének cselekedni, de nem tudják, mikor és hogyan. Ami talán közös: a többség a saját „portájával” és az ivóvízzel foglalkozik. Kevesen teszik fel a kérdést: mi történik az elszennyezett vízzel, hová jut és milyen károkat okoz, mit jelent a víz az állatok és a növények számára, mekkora a felelősségünk abban, hogy a jövő generációk is elegendő tiszta vízhez juthassanak, mit tehet a társadalom és az egyes ember azért, hogy vízünk egészségesek legyenek?



A Föld a Holdról

## Mi a víz?

### A csodálatos vízmolekula és az élet

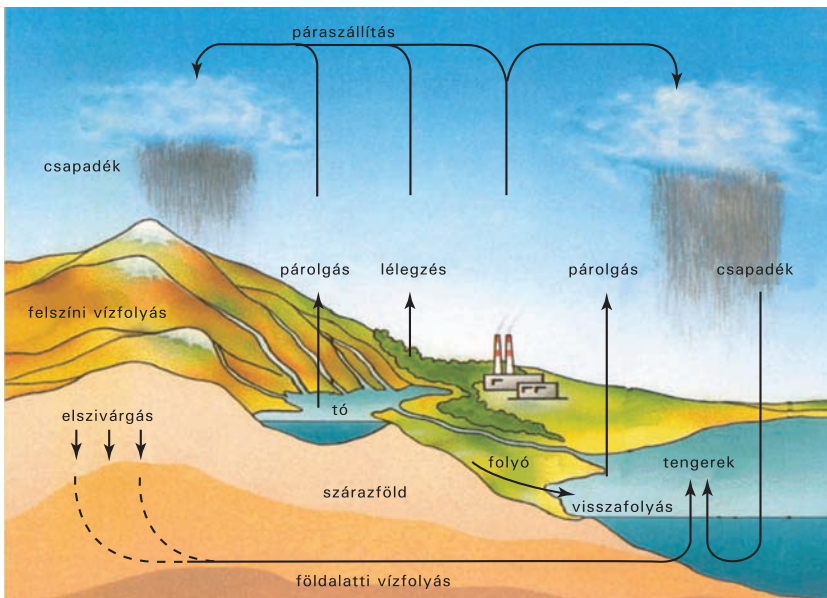
A tudományban, de sokszor a művészetekben is tapasztaljuk, hogy a legegyszerűbb a legszebb és a legtökéletesebb. Ilyen csoda a vízmolekula: a létező legegyszerűbb és legkisebb aszimmetrikus molekula (a 16-os tömegszámú oxigénatomhoz két, egymással 105°-os szöget bezáró, 1-es tömegszámú hidrogénatom kapcsolódik). Liliputi mérete  $10^{-10}$  m vagy  $10^{-13}$  km nagyságrendű, de tulajdonságai ennek ellenére tavak, folyók, vízgyűjtők, kontinensek és a földgolyó sorsát befolyásolják. A legfontosabb jellemzője talán a hidrogénhídkötés: az egyes molekulák szilárd és folyékony halmazállapotban egyaránt nagy erővel kapcsolódnak egymáshoz. Ez sokféle következménnyel jár. A víz az egyetlen folyadék, amelynek a sűrűsége a hőmérséklet függvényében – „anomálishan” – maximummal bír (4 °C-on), minden más hőfokon kisebb. Ez a magyarázata a **mély tavak** rétegződésének és a **sekély tavakétól** alapvetően eltérő „szabályos” viselkedésének (a sekély állóvizekben a rétegződést a szél által bevitt kinetikus energia nem engedi kialakulni). A jég térfogati tágulása okozza a kőzetek fizikai mállását, ami a talajképződés első lépése, valamint azt, hogy a jég úszik a vízben, s így megvédi az alatta levő víztömeget és élővilágot a befagyástól, illetve a lehűléstől. A víz forrásával járó térfogati munkát hasznosítja az ipari társadalom kulcsfontosságú technikai újítása, a gőzgép, illetve az újabb erőművekben a gőzturbina. A víz mindent old, ami képes a hidrogénhídkötésben részt venni. Ezért alakulhatott ki az élet – a fehérjemolekulák hidratált állapota – az ósóceánokban, de a genetikai információt hordozó DNS sem létezne víz nélkül. A légkör oxigéntartalma, amely lehetővé tette az élet kifejlődését, fotoszintézisből származik, amelyben a víz nélkülözhetetlen reakciópartner. A *Homo sapiens* mintegy 60 százalékban víz. Táplálékunk jelentős részére ugyanez igaz (burgonya – 78%, tojás – 75%, marhahús – 64%, pizza – 48%, kenyér – 38%, vaj – 16% stb.). Az ember mégél egy hónapig élelem nélkül, de tiszta víz nélkül csak néhány napig.



Jégzajlás

A víz az egyetlen közeg, mely szűk hőmérsékleti tartományon belül mindhárom halmazállapotban megtalálható. A fázisváltások teszik lehetővé a víz hidrológiai körforgását, aminek hajtóereje a napenergia. A folyamat nagyléptékű desztillációként képzelhető el. A vízmolekulák párolgás révén az óceánból a légkörbe lépve hátrahagyják a sóikat és szennyezőanyagait, és ennek eredményeként „tisztá” édesvíz jut a szárazföldre fölé, mely azonban tartalmazza a légkörből beoldódott gázokat. A lehulló csapadék a talajból és a kőzetekből különböző anyagokat old ki, miközben a felszíni vizekbe (majd a folyókon keresztül a tengerekbe és az óceánokba) fut, vagy a viszonylag lassabban megújuló felszín alatti vizekbe szivárog. – Képzeljük el az összes „drámát”, amit egy vízmolekula évezredek során átélhet, belegondolni is rossz...

A Föld globális vízkészlete állandó, mintegy 1400 millió  $\text{km}^3$ . Megújuló



A víz körforgása

erőforrásként évente mintegy félmillió  $\text{km}^3$  víz lép a folytonos, nagy körforgásba, és szállít magával sokféle más anyagot. A nagy körforgás számos – térben és időben változó – kicsi ciklus eredője (ez az oka, hogy a vízzel kapcsolatos gondok térségenként változó módon jelentkeznek). A teljes vízkészlet mintegy 2,5 százaléka édesvíz. Ezen belül a hasznosítható hányad csupán 0,6% (folyók, tavak és felszín alatti vizek). A globális vízigény (aminek 80 százalékát az öntözés teszi ki) a megújuló készletnek mintegy százada. A gondot a térben és időben roppant egyenlőtlen elosztás jelenti: vízhiányok, aszály és árvizek fordulnak elő. A vízzel ezért gazdálkodni kell, amit a hazai szakma is több száz éve hozzáértéssel tesz.

## Természetes vizek

Tiszta vizet a természetben nem találunk, azt csak mesterséges úton (desztillálás vagy fordított ozmózis) lehet előállítani. A természetes víz különös kémiai összetételű oldat, és egyúttal bonyolult keverék is, a vízi élővilág élettere. Helytől és időtől függően mindig tartalmaz oldott és szilárd (partikulált), szerves és szervetlen anyagokat, melyek lehetnek természetes és mesterséges eredetűek. Szennyezésnek a természetes vizeket károsan befolyásoló, vízgyűjtőről bejutó anyagokat tekintjük, amelyek a vízminőség romlását idézik elő. A vízminőséget általában az emberi használatoknak (ivás, öntözés, fürdés stb.) és az élővilág igényeinek való megfelelés alapján osztályozzuk.

A természetes vizek élővilága roppant változatos: az édesvizekben például több tízezer állat- és növényfaj található. Ezek közül a tápláléklánc alján található legkisebbek, a baktériumok, az algák (lebegő mikroszkopikus növények) stb. csupán néhány **mikron** ( $\mu\text{m}$ ) nagyságúak (a vízmolekulánál alig nagyobb, oly sok bajt okozó vírusok nem élőlények, ezért nehéz felfedezni őket). Az alga lehet néhány száz mikron nagyságú is: mé-

### Mély tó:

olyan tó, amelynek a szél csak a felső réteget keveri át, ezért tartós hőmérsékleti rétegződés alakul ki benne.

### Sekély tó:

olyan tó, amelynek vizét a szél fenéig felkeverheti, ezért nem alakul ki benne tartós hőmérsékleti rétegződés.

### Mikron:

$\mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  m).



**Biogeokémiai körforgás:**

az elemek körforgása a bioszférára élő és élettelen részeiben.

**Növényi tápanyagok:**

a növények fejlődéséhez nélkülözhetetlen szerves anyagok. A legfontosabbak a C, H, N, O és a P. Szén, hidrogén és oxigén a természetben szinte korlátlanul rendelkezésre áll, míg nitrogénből és foszforból hiány alakulhat ki.

**Biodiverzitás:**

az ökológiai társulásban jelenlévő fajok sokszínűsége. A fajok számával növekszik.

**Bioakkumuláció:**

anyagok felhalmozódása a táplálékláncban. A felsőbb szintek felé az élőlényekben mérhető koncentráció nagyságrendekkel növekedhet.

**Mikroszennyezők:**

olyan, többnyire nem lebomló, természetidegen szennyező anyagok, amelyek nagyon kis koncentrációban ( $\mu\text{g/l}$ ) is mérgezőek lehetnek. Ide tartoznak a nehézfémek és számos szerves vegyület (pl. egyes növényvédő szerek és szénhidrogén-származékok) is.

**Tradicionális szennyezők:**

többnyire a szerves anyagot és a növényi tápanyagokat értik alatta.

rettartományuk két nagyságrendet, térfogatuk négy-öt nagyságrendet ölel fel. A vízi tápláléklánc legnagyobbjai, az édesvízi halak néhány méteresek is lehetnek.

A biológiai produkció során az anyag – a szennyezésektől befolyásoltan – a termelés és a lebontás révén állandó körforgásban van. A körforgás során a különböző anyagok térben is áthelyeződnek, és kölcsönhatásba léphetnek az üledékkel, a talajjal és a légkörrel. Az időben és térben változó fizikai, kémiai és biológiai folyamatok sokasága befolyásolja a vízminőség alakulását és az anyagok **biogeokémiai körforgását**.

## A víz halál is

A szennyvíz fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai, fajszegény élővilága miatt számottevően eltér a természetes vizektől. Gyakoriak benne a kórokozók. Ipari, háztartási és mezőgazdasági célokra „elhasznált” közeg. A különböző szerves és szervesetlen szennyezők és **növényi tápanyagok** nagy koncentrációban, „besűrűsödve” vannak benne jelen. A társadalom által használt bármely anyag előbb vagy utóbb kimutatható benne.

A természetes vizekbe jutó szennyvizek és szennyezések hatásai sokféle lehetnek: például az elemek, az anyagok és a vegyületek túlzottan alacsony vagy magas koncentrációja, a kémiai és fizikai környezet módosulása, a biológiai körforgás és az ökoszisztéma torzulása, bizonyos élőlények eluralkodása és a **biodiverzitás** csökkenése, mérgezés, egészségkárosító hatások és így tovább (ezek gyakran egyszerre, egymást befolyásolva jelentkeznek). Mindezek gátolják, megdrágítják vagy éppen megakadályozzák a vízhasználatot és súlyos, hosszabb távon jelentkező károkat okozhatnak.

Az 1950-es évek elején Japán egy kis falujában, Minamatában sok lakosnál idegrendszeri elváltozásokat tapasztaltak. A szerencsétlenebbeknél a gyenge szimptomákat erős reszketés, paralízis és esetenként halál követte. Sok csecsemő tragikusan eltorzult és mentális sérüléssel jött világra. A vizsgálatok higanymérgezést mutattak ki. A Chisso vegyigyár éveken keresztül vezette a magas higanytartalmú szennyezését (higany-szulfát formájában) a Minamata-öbölbe. A higany-szulfát a vízben rosszul oldódik, és a feltevés az volt, hogy az üledékben „örökre” eltemetődik. A vizsgálatok kimutatták, hogy ez a vegyület még rosszabbul oldódó higany-szulfiddá redukálódott, amit azonban az üledékben található baktériumok erősen toxikus metil-higany kationná alakítottak át. Ez utóbbi anyag a vízben oldódva ugyan csak  $\mu\text{g/l}$  koncentrációban volt jelen, de feldúsult a táplálékláncban: a halat és kagylót fogyasztó emberek szervezetében veszélyesen sok mérgező anyag halmozódott fel. Több mint 3500-an megbetegedtek, és közel ötvenen meg is haltak. Ezt követően vezették be a  $\mu\text{g/l}$  koncentrációban is rendkívül veszélyes ún. **mikroszennyezők** fogalmát, és az Egészségügyi Világszervezet (WHO) elkészítette a veszélyes anyagok (nehézfémek, DDT, poliklórozott bifenilek – PCB, poliaromás szénhidrogének – PAH stb.) ún. feketelistáját. Ezek az

anyagok – a **tradicionális szennyezőkkel** szemben – nem (vagy csak nehezen) bomlanak a természetben (perzisztensek), ezért kibocsátásukat igyekeznek tiltani.

## Mi tehát a víz?

Szinte minden és mindennek az ellentettje. Élet és halál. Szakrális szimbólum. Élvezeti cikk. Természeti kincs és szépség. Áru és közjó. Véges, megújuló és sérülékeny erőforrás. Kockázati tényező. Fejlődés. A fejlődés korlátozója. Stratégiai jelentőségű, konfliktusos közeg.

## A víztudomány területe és céljai

### Mi a víztudomány?

Alkalmazott mérnöki tudomány, amelyet korábban főként hidrológiának hívtak. Mára a vízzel kapcsolatos kérdések igen bonyolultakká váltak: kezelésükhöz elengedhetetlen a kémia, a biológia, az ökológia, a fizika, a vízgazdálkodás, a környezet-gazdaságtan, a közegészségügy és egyéb tudományterületek együttes alkalmazása. A tervek készítése és megvalósítása mindig a mérnök dolga: korszerű műszaki szemlélet nélkül a vízzel okosan foglalkozni nem lehet.

A víz számos elméleti, gyakorlati és döntési kérdést vet fel. Tudásunk korlátozott. A felismert tudatlanságunk határáig komoly szerepet játszanak a bizonytalanságok, azon túl pedig a meglepetések. A legtöbb esetben a vízproblémáknak nincsenek optimális, de gyakran még jó megoldásai sem, és egy-egy projekt megítélése időben is változik. A mérlegelés sosem könnyű, és szubjektív elemekkel tarkított: meghatározó szerepe van annak, hogy ki milyen szempontok szerint dönt.

### Érdeklődésünk jellege

A felmerülő kérdéseknek megfelelően szinte mindig a jövőre vonatkozóan teszünk becsléseket. A múltból igyekszünk tanulni, és a rendelkezésre álló ismeretek alapján modellekkel és egyéb módszerekkel jelzünk előre (különböző – napi, évi, többévi stb. – távlatokat szem előtt tartva). Nem állítjuk, hogy mindig jó munkát végzünk. Sokszor viszonylag egyszerű jelenségeket sem ismerünk fel (utólag mindig könnyű okosnak lenni). Az amerikai National Science Council szerint „a tudomány inkább követte, mintsem vezette az alkalmazásokat”. A kiváló limnológus, Robert G. Wetzel megfogalmazásában „a problémákat sokkal inkább befogadtuk és kezeltük, mint megelőztük”. A cselekvést szolgáló tudomány („science for action”) messze nem használja ki a lehetőségeit, és a mérnöki intuíció sem mindig segít. A következő példasor ezt kívánja bemutatni.



*Japán színes fametszet részlete, 1827*



*Víztározó*

# Az angolvécétől az óceánig

## Járványok



*Snow, John (1813–1858)*

Kiindulópontunk a civilizáció egyik legjelentősebb innovációja, az öblítéses toalett. Feltalálója Sir John Harrington angol főnemes volt (bár kezdetleges formában már Minósz király krétai palotájában is használták i. e. 1700 körül). Harrington 1596-ban két prototípust készíttetett, egyet magának kelstoni otthonába, egy másikat pedig keresztanyjának, Erzsébet királynőnek. Az udvar azonban nem mutatott érdeklődést, és a találmány a feledés homályába veszett, egészen a 19. század elejéig, amikor kényelmi okok miatt egyre népszerűbbé vált.

Az angolvécé kezdeti használata – a közhiedelemmel ellentétben – káros volt: hozzájárult a járványok terjedéséhez. Az előregedett emésztőgödrök nem tudták tárolni a megnövekedett szennyvízmenységet, és elősegítették az akkor még ismeretlen kórokozók bejutását az ivóvízbe. A kolera, tífusz, hepatitisz stb. következtében 1849-ben Angliában hetente több ezren haltak meg (összesen közel százezren). Hasonló volt a helyzet Koppenhágában és sok más európai városban is, például Hamburgban, Párizsban, Stockholmban. Budán és Pesten (Budapest) 1831-et követően több kolerajárványt észleltek, a legsúlyosabb kb. kétezer áldozatot szedett (ami a lakosság több mint 1 százaléka volt). Az Egyesült Államokban több katona hunyt el a járványok miatt, mint a polgárháború alatt összesen.

A londoni járvány kezelésének kulcsszereplője John Snow londoni orvos, az epidemiológia úttörője volt. Snow behatóan vizsgálta az 1849. évi járványt, és eredményeit rövid közleményben tette közzé. Hipotézise szerint a kolera az elszennyezett ivóvízzel terjedt. Véleményét a tudós tesztek nem osztották, abban a meggyőződésben voltak, hogy azt légköri szennyezés okozta. Az 1854. évi kolerajárvány kitörését követően dr. Snow javaslatára a hatóság bölcsen elrendelte a fertőzési gócnak vélt népszerű Broad Street-i kút bezárását, bár a feltevést kevés tudományos ismeret támasztotta alá. Valójában a szennyezett víz és a kolera közötti kapcsolatot csak harminc évvel később bizonyította Robert Koch Németországban a „cholera vibrio” felfedezésével (amiért később Nobel-díjat kapott). A történet a ma egyre inkább hangsúlyozott elővigyázatosság elvének első sikeres alkalmazása, amihez hasonlóról talán azóta sem beszélhetünk.

A megoldást Londonban az 1854. évi járványt követően (és később máshol is) a megfelelő kapacitású, Temzébe (általában folyókba) torkoló csatornák kiépítése eredményezte. Ez, és az öblítéses vécé átgondolt használata együttesen biztosította a szennyvezetékek és a kórokozók gyors eltávolítását a háztartásokból (oly módon, hogy a szállítóközegként szolgáló vizet tudatosan elszennyezzük). Kiegészítő intézkedés volt a Temzéből kivett víz lassú homokszűrése, majd fertőtlenítése az ivóvízellátás céljából.



*Szent Rókus pestises betegeket kezel (Crespi, G. M. követője, 1700 körül, részlet)*

## Az oxigénháztartás felborulása

A járvány kérdését tehát, úgy tűnik, megoldották, mégpedig részben az öblítés toalett révén. Az árnyoldal a költséges csatornahálózat – ma lakosonként körülbelül 200 000 Ft csak a beruházási költség; és akkor még nem szóltunk a nagy vízfogyasztásról (ami a 19. század közepén még senkit sem érdekelt), a fenntartási gondokról és arról a tényről, hogy „amit nem látunk, azzal nem törődünk”. Sokkal nagyobb baj volt azonban, hogy a felszíni vizek jelentősen megnövekedett szervesanyag-terhelésére nem gondoltak. A Temze, az Ohio, a Rajna és később számos hazai folyó is szennyvízcsatornává vált, melyekre oxigénhiányos állapot, halpusztulás, elviselhetetlen bűz és az élővilág drámai torzulása volt jellemző. Azaz megoldottunk egy problémát, de előidéztünk egy másikat. Az elv a szennyvezők közvetlen környezetükből történő minél gyorsabb elvezetése és hígítása volt.

Némi időt igényelt a felismerés, hogy a halpusztulás elsődleges oka a szerves anyag, mert ennek baktériumok általi lebontása elfogyasztja a vízben oldott oxigént. A feladat a megbízható szennyvíztisztítási technológiák kifejlesztése volt. A századfordulóra megszületett a biológiai és a kémiai tisztítás. A biológiai, ún. eleveniszapos eljárás lényege, hogy a műtárgyakban nagy mennyiségben szaporítunk el szerves anyagokat bontó baktériumokat, miközben oxigént viszünk be a rendszerbe (a kezdeti megoldások csak a szerves szén oxidálták, majd felismerték a nitrogénformák átalakításának, a nitrifikációnak a fontosságát is). Kétféle végterméket kapunk: a légkörbe távozó szén-dioxidot és természetbarát iszapot (amennyiben azt az ipari előtisztítás hiánya nem teszi a környezetre veszélyessé). Az iszap sorsa kulcskérdés: okos megoldás a mezőgazdasági elhelyezés, a **biogáz** előállítás; a hibás gyakorlatot pedig a hulladéklerakó, vagy a visszavezetés a folyóba jelenti. A kémiai eljárás lényege a kicsapás és az ülepítés, ami a kezdeti időkben kezelhetetlenül sok iszapot eredményezett. Ezért a biológiai eljárások terjedtek el túlnyomóan. A szennyvíztisztítás (és a vízkezelés) nem olcsó, kb. 50 000 Ft/lakos a beruházási költsége (azaz a csatornázással együtt az összes költség kb. 250 000 Ft/lakos). A „víz- és csatornadíj” leegyszerűsítve az üzemelési költség fedezését szolgálja, ami durván az összes beruházási költség 5–10 százaléka.

Kis kitéréssel érdemes megjegyezni, hogy a hulladékanyagok kezelésére és elhelyezésére nem túl sokféle lehetőségünk van. A szennyvíztisztításon alapuló megoldás négy lehetőséget hasznosít: 1. átalakítás, 2. kibocsátás a környezetbe (víz, levegő és talaj), 3. tárolás vagy 4. újrahasznosítás (ennek mértéke az iszap sorsától függ). Az egyetlen további, 5. változat a használat betiltása és a kérdéses anyag helyettesítése (pl. DDT) – hacsak a „kilövést az űrbe” nem tekintjük alternatívának.

A szennyvíztisztítás tömeges elterjedése – a világháborúk által sújtott történelem során – még Angliában is legalább fél évszázadot igényelt. A fejlesztések többsége 1950 után történt, és kézzelfogható eredménnyel járt: sikerült rehabilitálni a Temzét (és más folyókat). Az 1980-as évekre újból megjelentek a lazacok, amit korábban kevesen hittek volna.

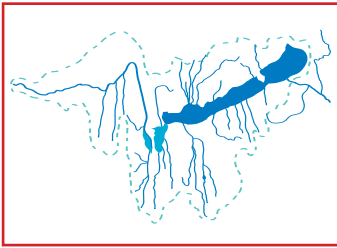


Szennyvízbevezetés hatása: oxigénhiány

### Biogáz:

szerves anyagok bomlásakor keletkező, metánból és más nagy energiatartalmú gázokból álló keverék.





A Balaton vízgyűjtő területe

**Eutrofizálódás:**

növényi tápanyagok (N és P) túlzott feldúsulása a vizekben. Hatására a vízinövények biomasszája megnövekszik, csökken a biodiverzitás, és oxigénháztartási problémák léphetnek fel. Az elszaporodó növények típusa szerint megkülönböztetünk algás, illetve makrofítonos (hinaras) eutrofizációt.

**Liebig-elv:**

a növények az egyes tápanyagokat meghatározott arányban veszik fel, ezért a biomassa elérhető nagyságát az az anyag korlátozza, amelyik a többihez képest a legkisebb mennyiségben áll rendelkezésre.

## Eutrofizálódás és a Balaton

Most sem voltunk azonban kellően elővigyázatosak. Mire az oxigénháztartási gondokat megoldottuk, „bezöldültek” a tavak. A bajt a tápanyagok túlzott feldúsulása, az **eutrofizálódás** okozza. Ez a folyamat súlyos ökológiai problémát jelent, számos veszélyforrással jár – ilyen például a toxinképző kékalgák megjelenése. Az eutrofizálódás kifejezés német eredetű műszó, amelyet az 1910-es években alkottak. Tehát a növényi tápanyag-feldúsulás jelenségét már akkor ismerték. Később megállapították, hogy a szabályozás szempontjából fontos ún. limitáló szerepet, a **Liebig-elv** szerint, a foszfor játssza (az elv azt mondja ki, hogy a szárazföldi növényekhez hasonlóan az algák szaporodását a szén, nitrogén és foszfor közül az az elem korlátozza, amelyik a 102:16:1 közelítő moláris arányhoz viszonyítva hiányosan áll rendelkezésre, és a gyakorlatban a legkönnyebben ez a foszforral érhető el). Ennek ellenére a szennyvíztisztítással foglalkozók évtizedeken keresztül csak a szerves anyag eltávolítására összpontosítottak, anélkül hogy a foszfor (P) felkeltette volna a figyelmüket.

A Balaton esetében nemzetközi híré limnológusok (tókutatók), Sebestyén Olga és Entz Géza már az 1940-es években figyelmeztettek a „kulturális” eutrofizálódás kedvezőtlen jeleire. A kiváló mérnök, Lesenyi Gábor tíz évvel később a foszforeltávolítás fontosságát hangsúlyozta. A területfejlesztési tervek a turizmus korlátozását javasolták. Mindeközben az idegenforgalom szabályozatlanul nőtt, fejlesztették az ivóvízellátást és a csatornázást, ami megnövelte a tó terhelését. Elkésve kezdődött meg a szennyvíztisztítási program, melyben a foszforeltávolítás nem szerepelt. Megkezdődött, majd felgyorsult „a másik bőr lenyúzása”: az intenzív mezőgazdaság, a műtrágyázás és a nagyüzemi állattartó telepek rohamos fejlesztése, amelyeket hasonlóan nyitott anyagkörforgalom jellemez, mint amelyet az öblítéses toalett eredményez. Két riasztó halpusztulás és a tó egészére kiterjedő, sokkoló

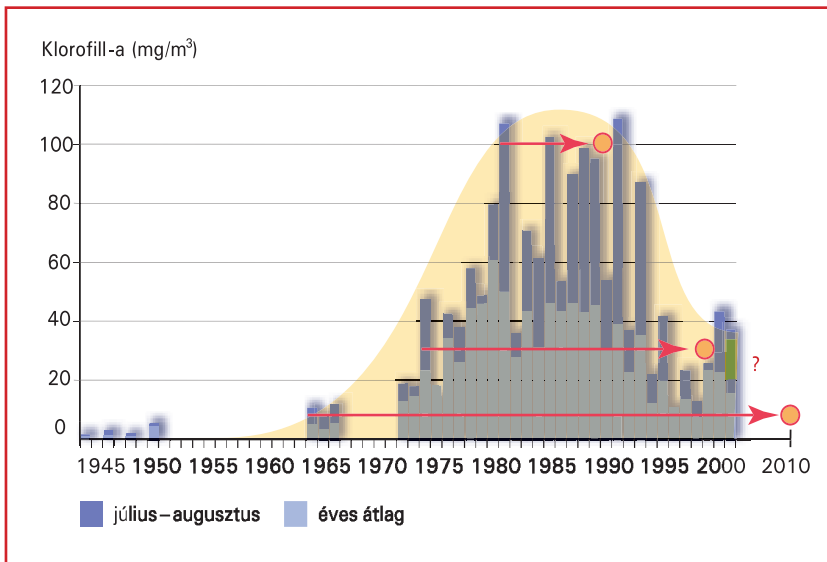
Eutróf tó



A szennyezett víz miatt bekövetkezett halpusztulás







Az algabiomassza változása  
a Keszthelyi-medencében

#### Biomassza:

az élőlények mennyisége.

#### Belső terhelés:

a vizet az üledékből érő tápanyagterhelés, amely a korábbi magas külső terhelés következménye.

#### Külső terhelés:

a vizet a vízgyűjtőről érő tápanyagterhelés.

#### Orto-foszfát:

$\text{PO}_4^{3-}$ . A növények által közvetlenül felvehető foszfortartalmú vegyület.

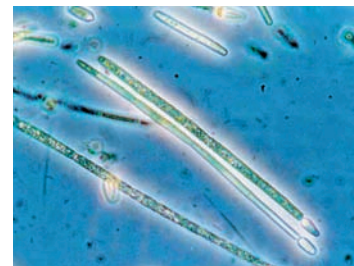
#### Diffúz (vagy nem-pontszerű) szennyezés:

olyan szennyező forrásból eredő szennyezés, amelynek helye, illetve kiterjedése pontosan nem határozható meg. Előidézője például a csapadék által kiváltott lefolyás és erózió vagy a légköri kihullás.

*Cylindrospermopsis raciborskii* – fonalas kékalga (cianobaktérium) – invázió vezetett végül 1983-ban egy átfogó rehabilitációs terv kidolgozásához.

A Balaton tápanyagterhelése – a térség fejlődésének következtében – az előző fél évszázad alatt mintegy nagyságrenddel nőtt. Válaszként – késleltetéssel – hasonlóan változott az algabiomassza (az egységnyi térfogatban található élő alga tömege) is, amely a hetvenes, majd a nyolcvanas évek elejére a Keszthelyi-medencében, illetve a tó egészében elérte a legkedvezőtlenebb, ún. hipertróf állapotot. Számos algafaj véglegesen eltűnni látszott. A domináns kékalga faj a légkörből képes nitrogént kötni, a foszforhoz pedig az üledékből jut (a **belső terhelés** következtében, aminek az a magyarázata, hogy a megelőző évtizedek során a tó által 90–95 százalékban visszatartott foszfort az üledék nem képes már közömbösíteni). A tó a **külső terheléstől** szinte független, „önjáró” állapota került. A legrosszabb minőség a Keszthelyi-medencében alakult ki: a tó térfogatának mindössze négy százalékát a vízgyűjtő fele terheli.

A becslések szerint az algák számára közvetlenül (rövid időn belül) hozzáférhető (oldott szervetlen, elsősorban **orto-foszfát** formájában jelen lévő) P-terhelés több mint fele szennyvíz eredetű, míg az összes P-terhelés nagyobb hányada a szántókról érkezik lefolyás és erózió révén, azaz mezőgazdasági nem-pontszerű eredetű (a légkörből származó terhelés 10% körüli). A következtetés kézenfekvő: a gyors eredmény érdekében a szennyvízkérdést kell megoldani (a vízgyűjtőről történő kivezetés és foszforkicsapatás révén), a hosszú távú célok elérése pedig a nem-pontszerű vagy **diffúz terhelések** szabályozását igényli, többek között a Kis-Balatonhoz hasonló előtározók révén. Ezekre a beavatkozásokra (és számos egyébire – foszformentes mosószerek használata, építési tilalom stb.) alapul a Balaton 1983. évi vízminőség-szabályozási kormányhatározata, amely részletesen tartalmazza a beavatkozások ütemezését is. A terv három célállapotot ír elő: A. a további romlás megállítását 1990-re, B. a hetvenes évek vízminőségének visszaállítását 1995–2000-re, és C. a hatvanas évek trofitásának elérését 2005–2010-re.



Fonalas kékalga,  
*Cylindrospermopsis raciborskii*



Az eutrofizáció hatására képződött vastag moszatpaplan

#### Fitoplankton:

különböző algafajok társulása a vízben.

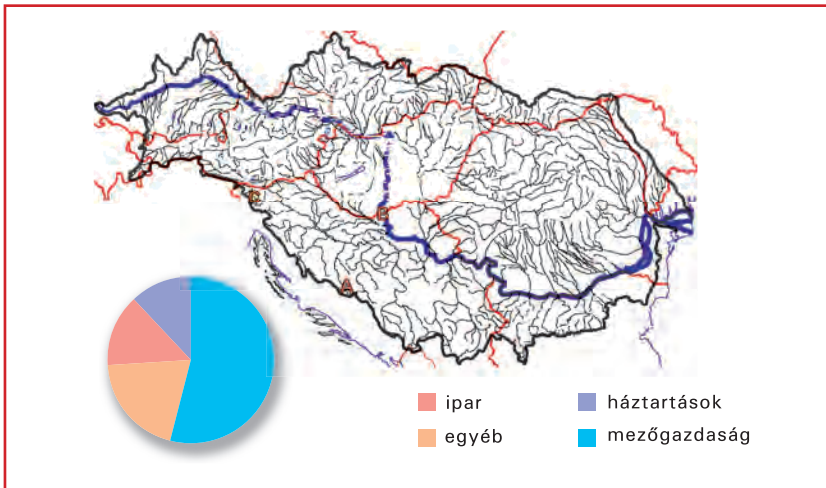
A terv a gazdasági recesszió és a rendszerváltás miatt késéssel valósul meg. Az összes P-terhelés (ÖP) mára mintegy a felére csökkent. A tó erről 1994-ig „mit sem tudott”, a minősége nem javult. 1995-től váratlan fordulat következett be, és a tavat immár nyolc éve jó vízminőség jellemzi. Ezt a **fitoplankton** szerkezete is igazolja: a mintegy harminc éve eltűnt fajok kezdenek visszatérni. Ebben elsődleges szerepet feltehetően az üledék vártnál gyorsabb megújulása és a belső terhelés ezzel összefüggő csökkenése játszott. Nyugtalanító azonban, hogy a jelenség teljes körű tudományos magyarázata egyelőre még hiányzik – megint csak követjük az eseményeket. A rehabilitációs program befejezéséhez és a C. állapot eléréséhez további terheléscsökkentés szükséges. Ez a mára meghatározóvá vált városi és mezőgazdasági nem-pontszerű szennyezés szabályozását igényli a területhasználattal együtt, ami sokkal nehezebb feladat, mint a pontszerű szennyezések mérséklése volt.

A Balaton ma sikertörténetnek tűnik. Esete 60–70 évet fed le a tudományos felismeréstől a remélhető „teljes” rehabilitációig.

## Beltengerek

Javult előrelátásunk? Aligha. Ma szinte az összes európai nagy folyó az eutrofizálódás jeleit mutatja. Ettől szenvednek a beltengerek, a Balti- és a Fekete-tenger is. Két nehézséggel állunk szemben: a) a terhelések nagyjából hányada mezőgazdasági nem-pontszerű eredetű; és b) a vizsgálatok szerint az édesvízi tavakkal szemben itt nem a foszfor a limitáló tényező, hanem a nitrogén vagy a kettő együtt. Egyértelmű az igény a N eltávolítására is a szennyvizekből. A megoldást a biológiai denitrifikációban találták meg alig több mint két évtizede (az elv már a 19. században ismert volt), amelyet a többi folyamattal párosítanak. A beltengerek megóvása és a sikeres technológiai fejlesztések vezetnek az Európai Unió új települési szennyvíztisztítási irányelvéhez, amely az ún. érzékeny térségekben a nagy városokra előírja a C, P és N tartalmú vegyületek együttes eltávolítását. A direktíva hazai bevezetésének beruházási költségigénye (a csatornázással együtt) mintegy 1000 milliárd Ft.

A tápanyag-eltávolítás, a költségek és a helyigény csökkentése számos új kihívást jelentett, melyekre a tudományos-műszaki fejlesztés kiváló választ adott. A korábban egyszerű, mérnöki „ökölszabályok” alapján tervezett eleveniszapos szennyvíztisztító-telepeken lejárászódo folyamatokat a biotechnológiai (mikrobiológiai, biokémiai és ökológiai) kutatások alapján ma már sokkal jobban ismerjük. A C, N és P tartalmú anyagok eltávolításának érdekében tudatosan hoznak létre olyan kémiai környezetet, mely az eltérő tulajdonságú baktériumok elszaporodását biztosítja célzottan. Korszerű mérés technikára alapozva bevezetik a szennyvíz összetételének korábbinál lényegesen részletesebb jellemzését, az eleveniszapos folyamatok laboratóriumi és félüzemi kinetikai vizsgálatát, továbbá matematikai modellezését. A biológiai eljárásokat egyre gyakrabban kombinálják kémiai módszerekkel a hagyományos P-eltávolítás mellett a kapacitás növelése, a biológiai tisztítási lépés tehermentesítése, a nitrifikáció hatékonyságának növelése ér-



Tápanyag-emissziók a Duna-vízgyűjtőn

dekében és számos egyéb ok miatt. Anyagtudományi és kolloidkémiai kutatások alapján nagy hangsúlyt fektetnek a kis dózisokat lehetővé tevő, optimális vegyszer-kombináció kifejlesztésére.

## Az óceán: a szúnyog és az elefánt esete

Az öblítéses toalettől tehát eljutottunk a nagy folyókig, a beltengerekig és mindezeket keresztül az óceánig. Egyetlen öblítés ideje lakásunkban néhány másodperc. A folyókon a levonulás néhány nap vagy hét (és akár 1000 km távolság is lehet). A tavak jellemző léptéke több év vagy évtized, illetve több száz vagy ezer kilométer. A beltengereké ennél is nagyobb lehet, az óceán átlagos tartózkodási ideje pedig 3000 év. A terhelések és a vízminőségi hatások saját kényelmünk jegyében, a lineáris anyagáramlás és a felszíni lefolyás révén fokozatosan áthelyeződnek: a rendszer alapvetően nyitott. Az óceán rehabilitációs ideje, ha egyáltalán van ilyen, többször 3000 év. A korábban helyesnek vélt hígítás tehát nem jelent megoldást.

A tartózkodási idő növekedésével a problémák több ok miatt egyre bonyolultabbakká válnak:

- › erősödik a kölcsönhatás a víz, a levegő és a talaj között, és a vízfázisra felírt egyszerű anyagmérleg távolról sem helytálló;

- › növekszik a „lomha” üledék szerepe, amelyet a felhalmozódás jellemez, és ezért a vízgyűjtő történetének memóriájaként működik (gondoljunk a folyók deltáira). Hosszú ideig „emlékezik”, és számottevő késleltetéssel adhatja le a megelőző évtizedek során túlzott mennyiségben felgyülemlett szennyező anyagokat (ez az oka sok nem fenntarthatóan használt víztér lassú vagy sikertelen rehabilitációjának);

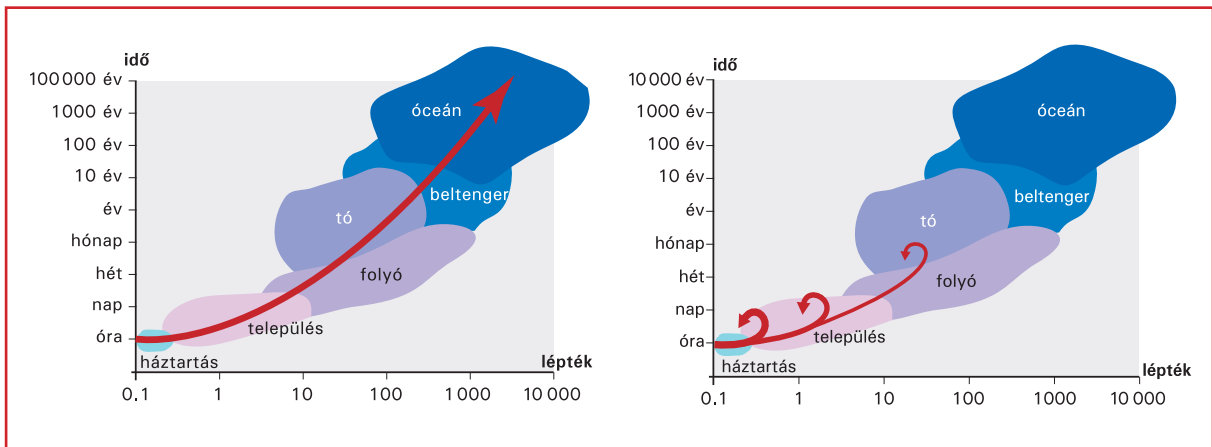
- › növekvő számú, ismeretlen kimenetelű reakció és biológiai átalakulás játszódhat le (amelyek a jellemző reakcióidő, szaporodási idő és a tartózkodási idő viszonyától függenek);

- › szabályozási szempontból a problémák egyre nehezebben lesznek kezelhetők.



Óceán-part





#### A szennyeződések áthelyeződése

A felvázoltan túl a szennyező anyagnak még két terjedési pályája lehetséges. Egyik a talaj és a talajvizek irányában (pl. az emésztőkön keresztül): a lépték itt viszonylag kicsiny, a tartózkodási idő azonban akár a 10 000 évet is elérheti. A másik a hidrológiai körforgásba bekapcsolódva a légkör felé. Ebben az esetben az áthelyeződések és a nem-pontszerű szennyezések időléptéke rövid, a térbeli lépték azonban akár kontinentális is lehet (pl. savasodás): a szennyező anyagok transzport révén elszállítva rövid időn belül „visszahullhatnak ránk”. A három lehetséges pálya egymással kölcsönhatásban áll: a vízminőségi bajok mára összetett környezeti problémákká váltak.

## A jövő kihívása

A globális aggodalom jelentős része a népesség növekedéséhez és az egy főre jutó, fajlagos készletek csökkenéséhez kötődik. A szaporodás exponenciális, a 21. század végén a Föld lakossága meghaladhatja a 10 milliárdot.

Jelenleg a népesség négy-hat százaléka küszködik a fizikailag elégtelen mennyiségű vízből adódó gondokkal, ám gazdasági okok miatt mintegy 20% nem jut biztonságos ivóvízhez, elsősorban a Közel-Keleten és Afrikában. Miután a szaporulat elsősorban a vízben ma is szegény ázsiai és afrikai térségekben nagy (a népesség sok országban 20 év alatt megduplázódik), 2025-re ez az arány – az éghajlatváltozás hatásainak függvényében – akár tízszeresére is nőhet. A probléma az elsősorban a fejlődő országokra jellemző városiasodás miatt felerősödve jelentkezik (átláthatatlan vízi infrastruktúra, felszín alatti vizek túlzott mértékű kihasználása, a járványok nagy száma, az árvizekkel szembeni kiszolgáltatottság stb.). Jelenleg közel egymilliárd ember él biztonságos ivóvízellátás nélkül, két-hárommilliárd pedig megfelelő szennyvízelvezetés nélkül. Számuk 25 éven belül megkétszereződhet. A legfrissebb elemzések szerint az összes fejlesztési igény – ami alapvetően a harmadik világban jelentkezik – 6000 milliárd dollárra tehető: 30 éves „felzárkózást” feltételezve kamatmentesen évi 200 milliárd dollár támogatásra lenne szüksége a fejlődő világnak (az ismerethiány ennél fontosabb pótlásáról nem is beszélve).

Számos újszerű vízminőségi gonddal is szembe kell néznünk (ez alól a fejlett világ sem kivétel): például az egyelőre ismeretlen hatású szteroidok és a nagy távolságú repülés okozta potenciális járványok. Ma évente több ezer újabb, jelentős részben perzisztens és toxikus vegyületet szintetizálnak, amelyek piciny **koncentrációját** még a legfejlettebb műszerek birtokában is nehéz meghatározni, nem beszélve a hatásukról; az Egyesült Államok Környezetvédelmi Hivatalának (EPA) becslése szerint évente mintegy félmillió tonna peszticidet használnak az országban, amelynek nem elhanyagolható része jut a vizekbe. De említethetők a paraziták (*Cryptosporidium*, *Giardia lamblia* stb.), amelyeknek más az életstílusa, mint a baktériumoknak, és a toxikus kéalgákhoz hasonlóan nagy ellenállást tanúsítanak a megszokott fertőtlenítési eljárással (klórozás) szemben. Ismét a mikrovilághoz térünk vissza, amelyről az egyre érzékenyebb detektálási módszerek ellenére is csak roppant keveset tudunk. Kockázatterékenységgünk nő, a határértékek szigorodnak, de valójában nem tudjuk, mit hoz a jövő. A teljes biztonság világa – részben ismereteink gyarapodása következtében – eltűnt.

Balatoni kedvencünk, a *Cylindrospermopsis raciborskii* vándorlása is a globalizáció jeleit viseli magán. A trópusi Afrika mély tavaiban fejlődött ki. Ez a még mérsékelten **invázív faj** eljutott Indonézia és Közép-Amerika néhány tavaiba. Ausztrália szélsőséges vízjárású folyói jelenthették a **cianobaktérium** másodlagos evolúciós központját. A néha csaknem teljesen kiszáradó, máskor hatalmasan megáradó folyókban a túlélés új képességek kifejlesztését követelte: eredeti környezetében a cianobaktérium alig termelt spórát, a szélsőséges ausztrál vízjárást azonban nagy mennyiségű spóra termelésével élte túl. Egyszersmind ez az új képesség lehetett az a tényező, amely invázív képességét megsokszorozta (rendkívül ellenálló fajról van szó: a spóra a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra való lehűtést is túléli). Ausztráliából valószínűleg vándorló vízimadarak hurcolták az 1930-as években Indiába és a Kaszpi-tenger északi területeire. Innen vízimadarak és folyók közvetítésével terjedhetett tovább. Az 1950-es években már al-dunai mellékágakban is azonosították. Az 1970-es évek végén megjelent több hazai vízben. A faj az 1990-es évekre Észak-Németországig jut – ez újabb meglepetés, hiszen csírázási és növekedési hőoptimuma magas ( $24$ , illetve  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Európai útja újabban dél felé kanyarodik, a vonuló madárcsapatok előbb-utóbb minden bizonnyal visszahurcolják afrikai őshazájába. A *C. raciborskii* „sikerében” biztosan szerepet játszott vizeink túlterheltsége, a vízi életközösség megváltozott működése is. A természetes társulások megbolygatásával és hatékony szállítási mechanizmusok biztosításával akaratlanul is segítjük az invázív fajok terjeszkedését.

Az egy főre jutó, csökkenő vízkészletek jelentős része – ésszerű ráfordításokat feltételezve – használhatatlanná válik a fokozódó szennyezések miatt. A ma társadalmá olyan nagy mennyiségű szennyező anyagot juttat a vizekbe, hogy azt sem a kémiai folyamatok, sem az élővilág nem képes feldolgozni. Az elmondottak alapján a növekvő léptékű, vízzel kapcsolatos bajok roppant sokfélék: járványok, oxigénhiány, eutrofizálódás, nitrátosodás, savasodás, természetidegen toxikus szerves és szervetlen mikroszennyezők meg-

#### Koncentráció:

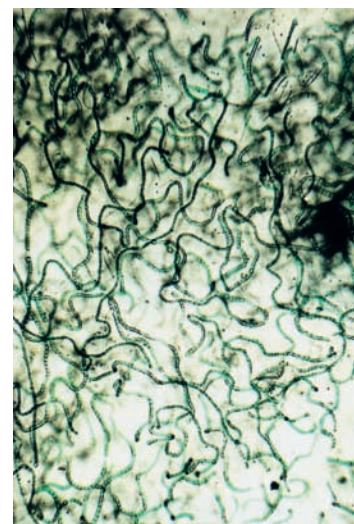
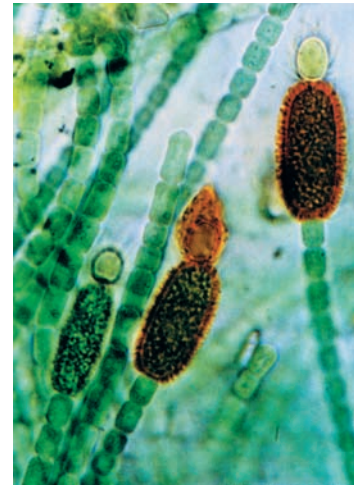
egységnyi térfogatban lévő anyagmennyiség; mértékegysége lehet például  $\text{g}/\text{m}^3$ .

#### Invázív faj:

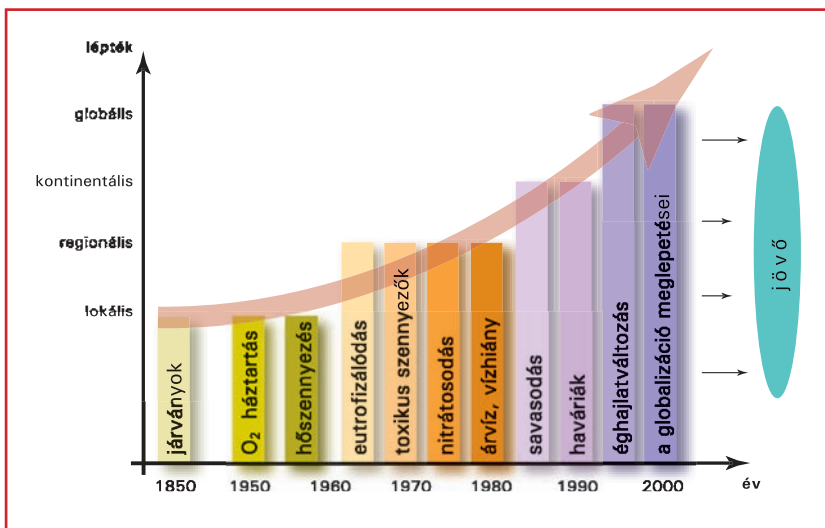
agresszív, terjeszkedő viselkedésű faj; például a parlagfű.

#### Cianobaktérium:

oxigéntermelő fotoszintézisre képes baktérium (kékalga).



Cianobaktériumok



A jövő kihívásai

jelenése, a fajlagos készletek csökkenése, az éghajlatváltozás hatásai, a nagy léptékű, súlyos árvizek szaporodása és egyebek. A valószínű jövőt – helytől függően – mindezek együttes megjelenése és meglepetések fogják jellemezni. Aggodalomra tehát bőségesen van okunk.

## Mit tudunk tenni?

### A tudomány és a számítástechnika fejlődése

Az alaptudományok és az alkalmazások rohamos fejlődése nagymértékben hozzájárul a sokasodó feladatok megoldásához. A szennyvíztisztítás területén a hatékony eljárások kifejlesztését már említettük. A korszerű mérés-technika teszi lehetővé a mikroszintű folyamatok feltárását és a korábban elképzelhetetlennek tartott kis mennyiségek meghatározását. A távérzékelés és a térinformatikai rendszerek új távlatokat nyitnak a mikroszintű ismeretek makroszkopikus kiterjesztésére. A rendszerelemzés és döntéstámogatás módszerei lehetővé teszik nagy horderejű, összetett problémák stratégiai kezelését. Kétség sem férhet hozzá, hogy a számítástechnika forradalmasította a vízzel foglalkozó szakmát (is). A „logarléces” korszakkal szemben lehetővé tette a legfejlettebb elméletek alkalmazását, a különböző tudományterületek integrálását valamely cél érdekében, és kísérletek elvégzését matematikai-számítástechnikai modelleken, a valóság leképezéseiben. A mérnök problémamegoldó szemlélete és módszerei mára alapvetően megváltoztak.

Az elmondottak alátámasztására két példát mutatunk be, amelyek mérés-technikai vonatkozásokat is tartalmaznak.

#### a) Balaton: szél keltette áramlás, elkeveredés és algásodás

A tavak – és különösen a Balatonhoz hasonló, a szél hatásának erősen kitett sekély tavak – megértését hosszú ideig akadályozta, hogy a bonyolult áramlásokat csak durva becslések révén voltunk képesek tanulmányozni. A leíró



egyenletek, a vízre és a növényi tápanyagokra vonatkozó folytonossági összefüggések, továbbá az energiamegmaradást kifejező mozgásegyenlet nehezen kezelhető parciális differenciálegyenlet-rendszert képez. Az egyenletek korábban reménytelennek hitt megoldása a tó egymáshoz illeszkedő, kis „elemekre” való felbontásán és az elemekre felírt közelítő algebrai egyenleteken alapul. Napjainkban, a szokásos számítógépi környezetet feltételezve, többször tízezer elemmel, illetve rácsponttal tudunk dolgozni, és a szélsőbesség változásait figyelembe véve akár éveket is szimulálhatunk, a valós időnél két-három nagyságrenddel gyorsabban.

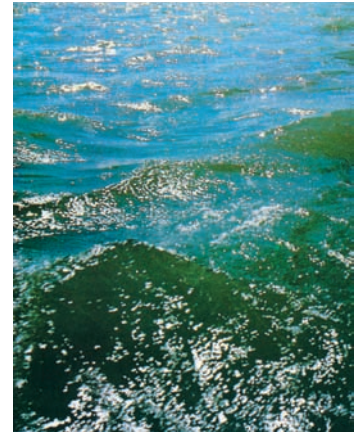
A Balaton esetében a számítások kiválóan szemléltetik a tó egyes medencéiben kialakuló nagyléptékű forgókat (örvényeket), azok kinyílását és bezáródását, a különböző lengéseket, és azt a tényt, hogy a víz nemritkán a széllel szemben áramlik. A hosszirányú lengésekre jellemző, hogy például a tihanyi szorosnál egy-egy nagyobb vihar alatt dunányi víz áramolhat nyugatról keletre, majd néhány órával később, a lengésidőt követve az ellenkező irányba. A forgók a tóba bejutó tápanyagok gyors keresztirányú elkeveredését és hosszirányú diffúziós terjedését idézik elő. A jelenség a legszemléletesebben részecskeszimulációval követhető nyomon: több tízezer részecske pályáját állíthatjuk elő, mintha a természetben vagy a laboratóriumban nyomjelzővel kísérleteznénk. Vizsgálható például a Zala-víz elkeveredése vagy a Keszthelyi-medence „algafelhőjének” mozgása kelet irányában, ami azután befolyásolja a többi medence **trofitását**.

A módszer a folyadékok mechanikájában az ún. lagrange-i tárgyalásmód alkalmazásának felel meg. Az egyetemen korábban azt tanultuk, hogy a **lagrange-i szemlélet**mód kizárólag elméleti jelentőségű. A számítástechnika mára virágzó alkalmazási területet hozott létre, beleértve virtuális kísérletek elvégzését is.

Mérések persze sosem nélkülözhetők a megértés, továbbá a modellek bearányosítása és igazolása érdekében. A modellek fejlesztése nagymértékben „előreszaladt”. A szűk keresztmetszetet az adatok jelentik (az igény a modellek bonyolultságával arányosan nő). Kiutat a mérés technika fejlesztése jelenti. Számos biztató jellel találkozunk. A Balaton esetében is alkalmaznak már korszerű akusztikus elven alapuló sebességérzékelőket, amelyek képesek a kis sebességek gyors időbeli változásainak nyomon követésére, és lehetővé teszik az összevetést a számításokkal. Az észlelések alátámasztják az áramlási modellek fejlesztésének helyességét.

Az eutrofizálódás jellemzésére az áramlási és transzportmodellhez most már csupán valamely alga- vagy tápanyag-körforgási modellt kell hozzákapcsolnunk, amely többek között leírja a P-felvétel és -leadás, a fotoszintézis, a mineralizáció, a víz–üledék kölcsönhatás, a vízbéli fényelnyelés stb. folyamatait. A fejlesztésnek talán ez a legbonyolultabb eleme, hiszen az elméleti ismeretek gyengébbek, mint a fizikai jelenségek esetében. A szimulációk heti alga-biomassza vagy klorofill-a mérésekkel való összevetése azonban biztató, bár nyilvánvaló, hogy megértésünk korlátozott és az észlelések hiányosak.

Az időbeli változások korábbinál jobb feltárása érdekében több ország tudósaival közösen végzünk kutatásokat az EU V. K + F Program keretében. A vizsgálatok középpontjában az ún. késleltetett fluoreszcencia elvén



*Szél keltette áramlás*

#### **Trofitás:**

a víz szervesanyag-termelő képessége. Fokozatai a legkisebbtől a legnagyobbig: oligotróf, mezotróf, eutróf, hipertóf.

#### **Lagrange-i szemlélet:**

a folyadékok viselkedését nem abszolút koordináta-rendszerben (euleri szemlélet), hanem az egyes folyadék-részecskék pályája mentén vizsgáljuk.

alapuló, meteorológiai állomással egybeépített fotoszintetikus aktivitást és algabiomasszát mérő műszer fejlesztése áll, mely a jelenlegi heti méréssel szemben óránként legalább két adatot szolgáltat.

A mérés elve a következő. Az algák a szárazföldi növényekhez hasonlóan a látható fényt használják a fotoszintézishez. A fotoszintézis során az elnyelt fényenergia elektront bocsát ki a klorofillból. Az elektron soklépcsős szállítórendszeren vándorol keresztül, míg végül szén-dioxidból szerves anyag keletkezik. Ha a fényt hirtelen kikapcsoljuk, az elektronok visszafordulnak, és energiájukat részben fénykibocsátással vesztik el. A jelenséget késleltetett fluoreszcenciának (KF) nevezzük. Érzékeny fotocellával megmérhetjük, mennyi elektron áramlott visszafelé. Kihasználhatjuk, hogy a különböző algák nagy változatosságban tartalmaznak fényelnyelő pigmenteket, melyek más és más hullámhosszúságú fényt képesek elnyelni. A monokromatikus fénnel megvilágított algákat sötétbe helyezve, és a kibocsátott fotonokat hullámhosszanként megszámlálva olyan KF spektrumot kapunk, melyből kiolvashatjuk, milyen algák milyen mennyiségben voltak jelen a mintában. A mérést automatizálhatjuk, így folyamatosan nyomon tudjuk követni a fő algacsoportok biomasszájának és fotoszintetikus aktivitásának változását. Ezáltal számottevően javíthatjuk ismereteinket, és pontosíthatjuk modelljeinket. Vizsgálhatjuk a napszakos változást, de azt is, hogy nem fenyeget-e a közeljövőben a kellemetlen kékalga tömeges elszaporodása.

### *b) A Tisza árvízi szabályozása*

Az árvizek a legsúlyosabb természeti katasztrófák közé tartoznak. Európában 1987 és 1996 között száz jelentős árvíz pusztított, az anyagi kár közel 100 milliárd € (25 ezer milliárd Ft) volt. Az elmúlt évek drámai tiszai árvizeire és a 2002. évi európai katasztrófákra mindannyian emlékezünk. Erősödik a meggyőződés, hogy a „meglepő” események kiváltói az éghajlat és a területhasználat változásai, amelyek különösen a több országra kiterjedő, osztott vízgyűjtőkön kitüntetett figyelmet és nemzetközi összefogást igényelnek. Itthon a Tisza szabályozásának újragondolása vált több ok miatt időszerrév. Egyértelműen jelentkezett az igény az erős fizikai alapokkal rendelkező árvízi döntéstámogató rendszer kidolgozására, amely képes a két magyarországi vízgyűjtőt egységesen kezelni.

A Balaton példájára hivatkozva a rendszert nem nehéz elképzelni. Egy ilyen rendszer domborzati modellre (ennek felbontása akár 50×50 m is lehet), úrfelvételből nyert vegetációs és területhasználati térképekre, talajtani információkra, radar csapadékmérésekre stb. alapozva, térinformatikai keretbe foglalva számítja a felszíni és felszín alatti lefolyást a vízgyűjtőn, a mederbeli lefolyást, a vízszinteket és a vízhozamot. Lehetőséget biztosít különböző szabályozási alternatívák kidolgozására és értékelésére: szóba jöhet például a töltésemelés, a tározás különböző helyeken, itthon és külföldön, a szükségtározás és a nem veszélyeztetett területek „kormányzott” elárasztása, a beavatkozások a hullámtéren és egyebek. A közös árvízi stratégia kidolgozását célzó döntéstámogató rendszer fontos elemét képezi a Tisza menti országok együttműködésének.



*A Tisza szabályozási terve (részlet,  
1860)*

## Vizeink védelme a háztartásokban kezdődik

Jelenleg a fejlett Európában fejenként és naponta pazarló módon mintegy 240–250 liter vizet használunk. Ebből körülbelül 50 l/fő/nap az ún. fiziológiai vízhasználat (vécé), 110 l/fő/nap „megy el” a konyhában és a fürdőszobában, és ezekhez adódik – helytől függően – átlagosan 80 l/fő/nap veszteség (pl. elszivárgás a vízellátó hálózathoz). A mai háztartások jellemzője, hogy a legjobb minőségű ivóvizet használja függetlenül attól, hogy ivásról, főzésről vagy vécéöblítésről van szó.

A vízhasználat különösebb nehézség nélkül több mint 50 százalékkal csökkenthető lenne a hálózatok karbantartásának javítása, a víztakarékos berendezések elterjedése és a hatékony árpolitika révén (az utóbbi elkerülhetetlen: az EU 2000-ben érvénybe lépett egységes vízpolitikája, az ún. Víz Keretirányelv tíz éven belül kötelezően előírja a költségek teljes megtérítését a szolgáltatást igénybevevők által). Az elemzések szerint a fenti használatok rendre 25, 55 és 25 l/fő/nap értékre csökkenthetők, az ivóvíz felhasználása pedig akár 50 l/fő/napra is mérsékelhető, amennyiben azt csupán konyhai és fürdőszobai használatra korlátozzuk. Ebben az esetben a fiziológiai szennyezést a többitől elválasztjuk: ezt nevezzük „fekete” szennyvíznek, a fennmaradót pedig „szürkének”. Ha továbbra is öblítést alkalmazunk, erre a célra tisztított „szürke” szennyvizet vagy esővizet használunk, ami az épületeken belül kettős hálózatot igényel.

A háztartásokban a vízen túl a vízminőségi bajokat okozó szénnel, foszforral és nitrogénnel is gazdálkodunk. Ezek részben fiziológiai eredetűek, részben pedig a konyhában és a fürdőszobában keletkeznek, és az „integrált” gazdálkodás érdekében célszerű hozzájuk számítani a lebontható konyhai (bio)hulladékot is. Az eredet szerinti összetétel érdekes képet mutat. A szén körülbelül egyenletesen oszlik meg (1) a vécé, (2) a konyha és a fürdő, illetve (3) a biohulladék között. A nitrogén több mint 80 százaléka és a foszfor közel fele a vizeletben (naponta mintegy 1,5 l/fő) és a székletben található. A foszfor másik fele konyhai hulladékból származik. Az öblítéses toaletten alapuló megoldás a különböző anyagokat és szennyezéseket egységesen a vízfázisba viszi át, ugyan eredendően csupán a második forrás jelent olyan folyékony szennyezést, amelynek elszállítására valóban a víz jelenti az egyetlen megoldást.

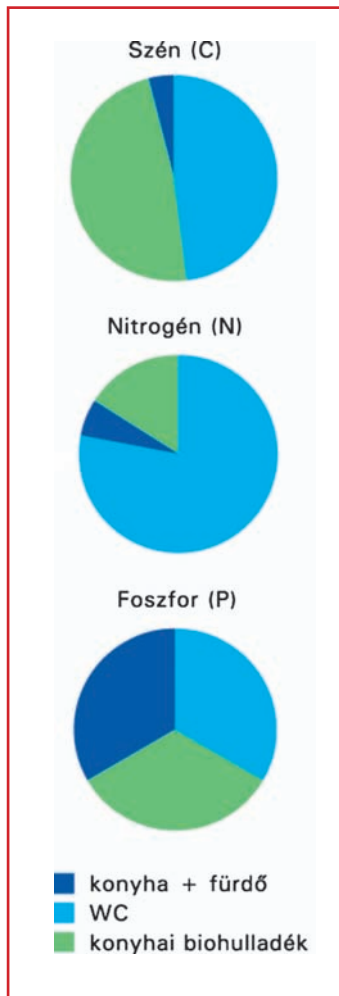
Amint az angolvécé adta kötöttségtől elszakadunk, a vízfogyasztás csökkentésével együtt az anyagokat tudatosan különböző irányokba terelhetjük, figyelembe véve a könnyű tisztíthatóságot, a víz visszaforgatását, az újrahasznosítást, az anyagkörforgások zárását és mindezek eredményeként a fenntarthatóságot. Itt csupán két (egymást nem kizáró) alapelethez említenünk: (1) a jelenlegi rendszer alkalmazása a biohulladék bevonásával; és (2) a fiziológiai hulladék szétválasztása és együttes kezelése a biohulladékkal.

Szabadságfokunk ily módon nagymértékben nő, és számos megoldási változat kínálkozik. Az első esetben a jelenlegi harmadát kitevő, de annál mintegy ötször sűrűbb, technológiai szempontból kedvező összetételű szennyvizet kapunk, amit anaerob úton (vagy anaerob előtisztítással) kezelünk, a keletkező biogázt pedig energiatermelésre hasznosítjuk. A második (decentralizált)



*Tiszai árvíz, 2001*





Szennyvíz- és hulladék-  
gazdálkodás a háztartásokban

esetben híg, szürke szennyvíz és néhány kg/fő/nap fekete szennyvíz (vagy hulladék) keletkezik. Az előbbi egyszerűen tisztítható aerob módszerrel, megtakarítva a fajlagosan legköltségesebb nitrogén-, továbbá gyakran a foszforeltávolítást is. A tisztított víz alkalmas öntözésre vagy további kezelés után másodlagos vízként a háztartásokban. A fekete szennyvíz szintén kezelhető anaerob úton (akár az [1] típusú telepre történő szállítás révén, tudva, hogy valamely térségben minden bizonnyal eltérő jellegű rendszerek alakulnak majd ki a városokban, elővárosokban és a környező kisebb településeken), vagy komposztálható és a mezőgazdaságban hasznosítható.

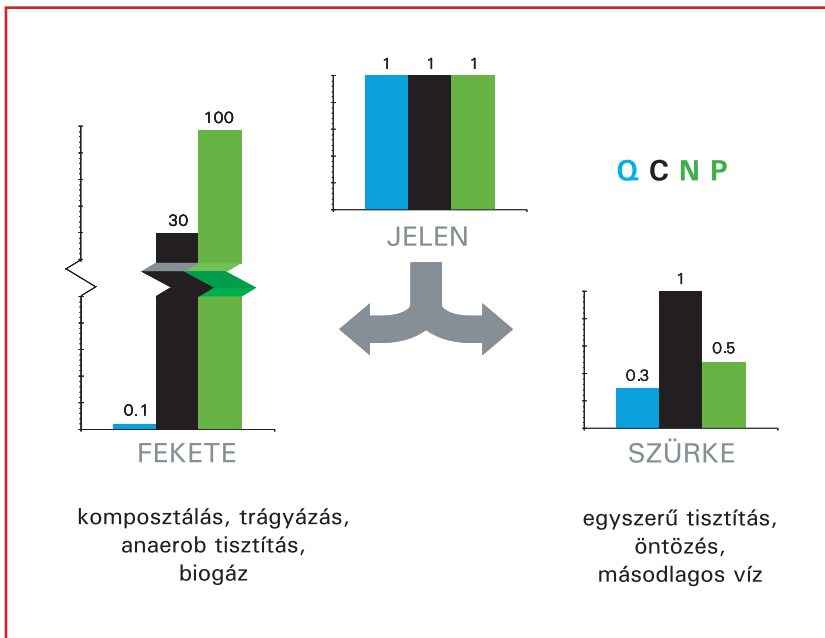
Állításunk tehát az, hogy jelenlegi tudásunk birtokában elvileg a meglévőnél jobb, kevesebb energiafelhasználással és szén-dioxid-kibocsátással járó, olcsóbb, zárt ciklusokra épülő, a vizeket megóvó és fenntartható megoldásokat tudunk kidolgozni. Természetesen ezek függenek a települések jellegétől, az éghajlattól, a meglévő infrastruktúrától, a környezeti jogi szabályozástól, a környezeti ipar rugalmasságától és számos egyéb tényezőtől.

Mennyi idő szükséges a felvázolt elképzelések megvalósításához? Reálisan mintegy 20–40 évről beszélhetünk; új települések vagy peremvárosok esetében kevesebbről. Az okok magától értetődők. Így például a jelenlegi komfortszintet biztosító berendezések fejlesztéséhez, a potenciális felhasználók meggyőzéséhez és a piaci lehetőségek felismeréséhez szükséges idő említhető. Jó jel azonban, hogy kísérleti házak már több országban működnek, Lübeckben pedig 3,5 ha területen folyik egy, a fenti elveket követő rendszer megvalósítása.

További okot jelent természetesen a jelenlegi infrastruktúra rugalmatlansága, amely a múlt tradícióit akkor is őrzi, amikor azok már elavultakká váltak. Érdemes azonban szem előtt tartanunk, hogy lakásunkat 15–20 évenként felújítjuk vagy átépítjük, a szennyvíztelepek és a csatornahálózatok élettartama pedig 30, illetve 50 év körül van. Lehetőségek tehát igenis vannak, ha elég bátrak vagyunk és követjük Széchenyi bölcs mondását: „A réginek az újjal célszerű egybeházasítása gyakran a dolog bölcsészete. Máskor a réginek gyökerestől megsemmisítése és az újnak gyökeres felállítása szükséges”. Az „egybeházasítás” osztályába tartozik például a vizelet decentralizált gyűjtése, tárolása és szabályozott szállítása a szennyvíztelepre a meglévő csatornán belüli, kis átmérőjű vezetéken, majd a koncentrátum tisztítása a reggeli alutérhelt órákban. Hasonló, kettős csatornarendszer jelenthet megoldást a harmadára csökkent (szürke) szennyvíz elvezetésére is, a záporvíz-elvezetést is figyelembe véve (érdekes, hogy Koppenhágában a 19. század közepén eleve ilyen rendszert kezdtek el építeni, amit azután a kolerajárvány okozta félelem miatt felcseréltek a biztonságos, klasszikus megoldásra).

## A jövő fenntartható vízgazdálkodása

Érzékeljük, hogy az okos „háziasszonyi” gazdálkodás a háztartási szinten a település szintjén is alapvetően megváltoztatja a víz-, a szennyező- és tápanyag-, továbbá a hulladékgazdálkodást. Csökken a vízkivétel és a szennye-



A jövő integrált vízgazdálkodása

zők bevezetése, nő az újrafelhasználás és a hasznosítás, zárulnak a különböző anyagkörforgások.

Valójában a lehetőségek valamely vízgyűjtőn – a helyi adottságoktól függően – sokkal gazdagabbak, hiszen a vizeket a növényi tápanyagokkal együtt az igényeknek és az újrahazsnosítás lehetőségeinek megfelelően terelhetjük a településekről az ipar és/vagy a mezőgazdaság irányába (majd tovább), miközben – az öblítéses toalettől eltérően – az aktuális használatnak „éppen” megfelelő vízminőséget biztosítjuk. A vizek egy részét elhasználjuk, a vissza nem forgatott hányadot pedig (ami a jelenlegi szennyvízmennyiségnek csak töredéke) tisztítást követően vezetjük a befogadókba. Ez a gondolatmenet vezet el a jövő integrált vízgazdálkodásához, amelyet többek között az ökológiai szemlélet, a fenntarthatóság, a megelőzés, az elővigyázatosság, a szennyező fizet-elv, a költségek teljes megtérítése és a hatékonyság jellemez. Az EU vízpolitikája is ezeken az alapokon nyugszik. A jelen megoldásaival szemben a vízminőségi és -mennyiségi problémákat sem időben, sem térben nem helyeznénk át, így módon a határokon túlnyúló hatások is mérséklődnének vagy akár el is tűnnének. Természetesen a technikai megújulás csak mindannyiunk szemléletének megváltozásával együtt vezethet sikerhez. Ennek előfeltétele a köznevelés javítása az óvodától idős korunkig.

A vágyunk tehát az, hogy elegendő mennyiségű biztonságos, tiszta és egészséges víz álljon az emberek és a természet rendelkezésére. Lao-ce szavai-val élve: „A víz jósága az, hogy hasznára van minden létezőnek.” Rajtunk múlik, egyenként és együttesen, hogy így lesz-e.



A Szalajka-völgyi Szikla-forrás

## Ajánlott irodalom

- ARES – Árvízvédelmi Döntéstámogató Rendszer.* (Kézirat – BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék) Bp. 2002.
- Chiras, Daniel D.:* Environmental Science. Selection for a Sustainable Future. Fort Collins, 1990.
- Clement, A. – Istvánovics Vera – Somlyódy László:* A Balaton hosszú-távú tápanyagterhelése. In: *Somlyódy L. – Banczerowski, J.* (szerk.): A Balaton Kutatás Eredményei 1999-ben. Bp.: MTA, 2000.
- Cosgrove, J. W. – Rijsberman, F.:* World Water Vision: Making Water Everybody's Business. World Water Council, 2000.
- Cunningham, W. P. – Saigo, B. W.:* Environmental Science. A Global Concern. Dubuque, 1992.
- EEA: Late lessons from early warnings:* the precautionary principle 1896–2000. Environmental Issue Report No. 22., Copenhagen, 2002.
- Falkenmark, M.:* Living at the Mercy of the Water Cycle. Water Resources in the Next Century. Proceedings of the Stockholm Water Symposium. Stockholm, 1992.
- Glick P. H.* (ed.): Water in Crises: a Guide to the World's Freshwater Resources. New York, 1993.
- Harremoes, P.:* Dilemmas in Ethics: Towards a Sustainable Society. In: *Ambio*, Vol 25., No. 6. 1996.
- Henze, M. – Somlyódy, L. – Schilling, W. – Tyson, J.* (eds.): Sustainable Sanitation (special issue). In: *Water Science and Technology*, Vol. 35., No. 9. 1997.
- Istvánovics, Vera:* A belső terhelés és az időjárás szerepe a fitoplankton dinamikájában – complex terepvizsgálat a Balaton Keszthelyi-medencéjében. (Kézirat – MTA Támogatott Kutatóhelyek Irodája.) Bp.: 2002.
- Istvánovics V. – Koncsos L. – Somlyódy László:* A Balaton eutrofizálódását befolyásoló tényezők értékelése. In: *Somlyódy, L. – Banczerowski, J.* (szerk.): A Balaton Kutatás Eredményei 1999-ben. Bp.: MTA, 2000.
- Istvánovics, V. – Somlyódy, L.:* Factors influencing lake recovery from eutrophication – the case of Basin 1 of Lake Balaton. In: *Water Research*, Vol. 35., No. 3. 2001.
- Józsa, J.:* Sekély tavak szél keltette cirkulációs áramlásai. (Kézirat – MTA doktori értekezés.) Bp.: 2001.
- Kulsreshtha, S.:* World Water Resources and Regional Vulnerability: Impact on Future Changes. Research Report RR-93–10. IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), Laxenburg, 1993.
- Kundzewicz, Z. – Somlyódy, L.:* Climatic Change Impact on Water Resources – a Systems View. In: *Water Resources Management*, 1997/ 11.
- Moser, M.:* Körforgások a természetben és a társadalomban – Korunk világméretű alapjai. Bp.: 1997.
- Papp Sándor – Kümmel, Rolf:* Környezeti kémia. Bp.: Tankönyvkiadó, 1992.
- Postel, S.:* Last Oasis. Facing Water with Scarcity. New York, 1992.
- Schnoor, J. L.:* Environmental Modelling. Fate and Transport of Pollutants in Water. Air and Soil. New York, 1996.
- Somlyódy László* (szerk.): A hazai vízgazdálkodás stratégiai kérdései. Magyarország az ezredfordulón. Bp.: MTA, 2002.
- Somlyódy, László:* Water Quality Management: Can We Improve Integration to Face Future Problems? In: *Water Science and Technology*, Vol. 31., No. 8., 1995.
- Somlyódy, L. – van Straten, G.:* Modeling and Managing Shallow Lake Eutrophication. With application to Lake Balaton. Berlin, Springer Verl., 1996.
- Varis, O. – Somlyódy, L.:* Global Urbanization and Urban Water: Can Sustainability Be Affordable? In: *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 2., 1997.
- WCED: Our Common Future:* Report of the World Commission on Environment and Development (Brundtland Commission). Oxford, 1987.
- Williams, I.:* Environmental Chemistry. A modular approach. Chichester, 2002.
- World of Water 2000:* The Past, Present and Future. Water World and Water and Wastewater International, 1999.